

А. В. Ефимов<sup>1</sup>, М. В. Максимов<sup>2</sup>,  
Ю. В. Ромашов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

<sup>2</sup> Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

## Потеря устойчивости и форма возможного изгиба направляющих каналов тепловыделяющих сборок ядерных реакторов ВВЭР-1000

Определены критические сжимающие силы и соответствующие им формы возможного изгиба направляющих каналов тепловыделяющих сборок ядерных реакторов ВВЭР-1000 вследствие потери устойчивости в период эксплуатации. Полученные значения критических сжимающих сил показывают, что форма изогнутого из-за потери устойчивости направляющего канала может содержать несколько точек перегиба, следствием чего может быть увеличение времени падения кластеров поглощающих элементов вниз активной зоны реактора и нарушение, таким образом, нормальных условий эксплуатации реактора.

**Ключевые слова:** ядерный реактор ВВЭР-1000, тепловыделяющая сборка, направляющие каналы, изгиб, устойчивость, критическая сжимающая сила, формы потери устойчивости.

**О. В. Ефимов, М. В. Максимов, Ю. В. Ромашов**

### Втрата стійкості і форма можливого вигину напрямних каналів тепловидільних збірок ядерних реакторів ВВЕР-1000

Визначено критичні стискні сили і відповідні їм форми можливого вигину напрямних каналів тепловидільних збірок ядерних реакторів ВВЕР-1000 через втрату стійкості в період експлуатації. Отримані значення критичних стискних сил показують, що форма вигнутого через втрату стійкості напрямного каналу може містити кілька точок перегину, наслідком чого може бути збільшення часу падіння кластерів поглинаючих елементів до низу активної зони реактора і порушення, таким чином, нормальних умов експлуатації реактора.

**Ключові слова:** ядерний реактор ВВЕР-1000, тепловидільна збірка, напрямні канали, згин, стійкість, критична стискна сила, форми втрати стійкості.

© А. В. Ефимов, М. В. Максимов, Ю. В. Ромашов, 2015

Направляющие каналы (НК) тепловыделяющих сборок (ТВС) серийного ядерного реактора ВВЭР-1000 выполнены в виде труб 12,6×0,85 мм длиной около 4000 мм из стали 08X18H10T и являются несущими элементами ТВС; при этом внутри НК осуществляется движение поглощающих элементов системы управления и защиты реактора [1]. Отклонения от прямолинейной формы НК ТВС могут привести к увеличению времени падения кластеров поглощающих элементов до низа активной зоны ядерного реактора ВВЭР-1000 и нарушить, таким образом, нормальные условия его эксплуатации. При эксплуатации ядерных реакторов ВВЭР-1000 имели место случаи искривления НК ТВС вследствие потери устойчивости, приводившие к увеличению времени падения кластеров поглощающих элементов до низа активной зоны [1], что свидетельствует об актуальности исследования устойчивости и возможной формы изгиба НК ТВС.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Совершенствование ТВС в настоящее время является одним из главных направлений развития технологии ВВЭР [2–4]. Для ядерных реакторов ВВЭР-1000 с учетом опыта их эксплуатации постоянно проводятся интенсивные исследования по дальнейшему совершенствованию ТВС [1, 3, 5, 6] и изучаются возможности использования ТВС разных производителей [7]. Хотя ТВС ядерного реактора представляет собой достаточно сложный узел (сборочную единицу) [1], наибольшее внимание в последнее время сосредоточено на проблемах твэлов [8, 9]. Проблемы же, связанные с другими деталями и узлами ТВС, в том числе с НК, в периодической литературе обсуждаются нечасто, хотя от состояния НК, внутри которых движутся поглощающие элементы кластеров, в значительной степени зависит эффективность системы управления и защиты ядерного реактора ВВЭР-1000. Появление усовершенствованной, альтернативной базовой и достаточно совершенной ТВС для ВВЭР-1000 объясняется в основном недостаточной надежностью срабатывания аварийной защиты из-за искривлений НК ТВС вследствие потери устойчивости. Эти проблемы в свое время решены увеличением несущей жесткости ТВС [1]. Вместе с тем, явление искривления ТВС и НК, в том числе из-за потери устойчивости, в настоящее время изучены недостаточно, хотя их систематическое изучение именно сейчас представляется весьма актуальным в связи с повышенными требованиями к надежности аварийной защиты ядерных реакторов [3, 4] и необходимостью эксплуатации действующих в Украине ядерных реакторов с ТВС разных производителей [7]. Нормы расчета на прочность [10] предусматривают расчет на устойчивость, который заключается в определении критических нагрузок и (или) напряжений, вызывающих потерю устойчивости при осевом сжатии и (или) сжатии наружным давлением. Определение возможной формы изгиба из-за потери устойчивости элементов оборудования ядерных энергоустановок в нормах расчета [10] не предусматривается. Целью данной работы является определение критических сжимающих сил (и напряжений) и соответствующих им форм потери устойчивости НК ТВС ядерных реакторов ВВЭР-1000 на основе известных результатов теории устойчивости деформируемых систем [11, 12].

**Расчет НК ТВС на устойчивость в соответствии с нормами расчета на прочность.** Нормы расчета на прочность [10] предусматривают расчет на устойчивость, который заключается в определении критических нагрузок (и напряжений), вызывающих потерю устойчивости. В них приведены формулы для критических нагрузок цилиндрических оболочек,

выпуклых днищ и конических переходов при упругом деформировании и с учетом ползучести. В нашем случае НК ТВС рассматриваем как сжимаемые в осевом направлении цилиндрические оболочки. Для сжимаемых в осевом направлении цилиндрических оболочек нормами [10] предусматривается определение критического напряжения из условия общей устойчивости цилиндрического элемента как длинного сжатого стержня и из условия местной потери устойчивости тонкой цилиндрической оболочки [10]:

$$\sigma_{kr1} = 1,2E \left( \frac{D_m}{\eta L} \right)^2, \quad (1)$$

$$\sigma_{kr2} = 1,2E \frac{s-c}{D_m}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{kr1}$  и  $\sigma_{kr2}$  — критические значения сжимающего напряжения, отвечающие потере устойчивости направляющего канала как длинного стержня и местной потере устойчивости как тонкой цилиндрической оболочки;  $E$  — модуль упругости материала при заданной температуре;  $D_m$  и  $L$  — соответственно средний диаметр и расчетная длина;  $s$  и  $c$  — номинальная толщина стенки и суммарная прибавка к толщине стенки;  $\eta$  — коэффициент, зависящий от способа закрепления краев оболочки:  $\eta = 1$  — для шарнирно закрепленных краев оболочки,  $\eta = 0,7$  — для шарнирно закрепленного одного края и жестко закрепленного другого края оболочки,  $\eta = 0,5$  — для жестко закрепленных краев оболочки.

Примем следующие исходные данные (размеры и характеристики материала НК ТВС):  $D_m = 11,75$  мм;  $L \approx 4000$  мм;  $s - c = 0,85$  мм;  $E = 175$  ГПа (значение модуля упругости отвечает температуре 350 °С [10]).

Расчеты по формуле (2) с учетом исходных данных дают значительное критическое напряжение  $\sigma_{kr2} \approx 15191,5$  МПа, соответствующее местной потере устойчивости НК ТВС как тонкой цилиндрической оболочки, которое существенно превосходит минимальные значения предела текучести  $R_{p0,2}^T = 177$  МПа и временного сопротивления  $R_m^T = 412$  МПа труб из стали 08X18N10T при температуре 350 °С [10]. Таким образом, неограниченное увеличение сжимающего напряжения приведет к разрушению НК ТВС прежде, чем произойдет его местная потеря устойчивости как тонкой цилиндрической оболочки, поэтому местная потеря устойчивости НК ТВС как тонкой цилиндрической оболочки не может иметь места в условиях эксплуатации ядерных реакторов ВВЭР-1000 и далее не рассматривается.

Результаты расчетов критических значений (1) сжимающего напряжения, соответствующего потере устойчивости НК ТВС как длинного стержня, с учетом исходных данных для разных закреплений краев приведены в табл. 1.

Таблица 1. Критические значения сжимающего напряжения и силы для НК ТВС в соответствии с нормами расчета на прочность [2]

| Закрепление краев НК ТВС                | $\sigma_{kr1}$ , МПа | $P_{kr1}$ , кгс |
|---|----------------------|-----------------|
| Шарнирное обоих краев                   | 1,81                 | 5,80            |
| Шарнирное одного и жесткое другого края | 3,22                 | 10,30           |
| Жесткое обоих краев                     | 7,25                 | 23,18           |

Располагая площадью поперечного сечения НК, можем определить соответствующее напряжению (1) критическое значение сжимающей силы (табл. 1):

$$P_{kr1} = \sigma_{kr1} \cdot A, \quad (3)$$

где  $A = \pi D_m(s-c)$  — площадь поперечного сечения направляющего канала.

Невысокие, не превышающие 25 кгс, критические значения сжимающей силы (табл. 1) существенно ограничивают запас устойчивости деформирования НК как длинных сжатых стержней, что часто приводит к изгибу НК при их эксплуатации. Определение возможной формы изгиба вследствие потери устойчивости элементов оборудования ядерных энергоустановок в нормах расчета [10] не предусматривается, что заставляет использовать с этой целью результаты исследований в области устойчивости деформируемых систем [11, 12].

**Критические нагрузки и формы потери устойчивости сжатых стержней.** Как известно [11, 12], устойчивость деформирования сжатых стержней постоянного поперечного сечения (рис. 1) из однородного изотропного материала определяется с помощью дифференциального уравнения вида

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \mu^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = 0, \quad \mu^2 = \frac{P}{EJ}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (4)$$

где  $x$  — координата вдоль оси стержня;  $w = w(x)$  — прогиб стержня;  $P$  — сжимающая сила;  $E$  — модуль упругости материала стержня и  $J$  — момент инерции сечения стержня, характеризующие изгибную жесткость;  $L$  — длина стержня.

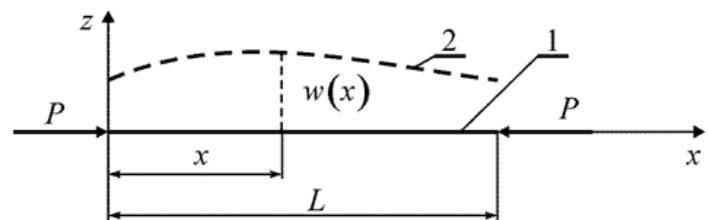


Рис. 1. Сжатый стержень (1) и форма его изгиба при потере устойчивости (2)

Общее решение уравнения (4) записывается следующим образом:

$$w(x) = C_1 \sin(\mu x) + C_2 \cos(\mu x) + C_3 x + C_4, \quad (5)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4$  — постоянные интегрирования.

Краевые условия, отражающие способы закрепления краев ( $x = 0, x = L$ ) стержня (рис. 1), и общее решение (5) приводят к системе однородных линейных алгебраических уравнений для определения постоянных интегрирования [11]. Условие существования ненулевого решения указанной системы уравнений в виде равенства нулю определителя ее матрицы, которое называют характеристическим уравнением, приводит для определения неизвестного  $\lambda \equiv \mu L$  к трансцендентному уравнению. Характеристическое уравнение имеет бесконечное счетное множество корней  $\lambda_k, k = 1, 2, 3, \dots$ , которые с учетом

второго равенства (4) и соотношения (3) позволяют определить критические сжимающие силы и напряжения:

$$P_k = EJ \left( \frac{\lambda_k}{L} \right)^2, \quad \sigma_k = \frac{P_k}{A}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

Имея значения корней  $\lambda_k, k = 1, 2, 3, \dots$  характеристического уравнения, можно определять отвечающие этим корням соотношения между входящими в общее решение (5) постоянными интегрирования, которые представляют формы потери устойчивости стержня [11]. Рассмотрим далее критические нагрузки и формы потери устойчивости для следующих вариантов закрепления краев сжатых стержней, представленных в нормах расчета на прочность [10]: 1) шарнирно закрепленные края, 2) один жестко закрепленный и другой шарнирно закрепленный край, 3) жестко закрепленные края.

1) Для шарнирно закрепленного на краях стержня характеристическое уравнение, его корни и соответствующие им формы потери устойчивости имеют вид [11]

$$\sin \lambda = 0, \quad (7)$$

$$\lambda_k = k\pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

$$w_k(\xi) = C_1 \sin(\lambda_k \xi), \quad (9)$$

где  $\xi = x \cdot L^{-1}$  — безразмерная координата вдоль оси стержня.

2) Для стержня с одним жестко закрепленным краем и другим шарнирным краем характеристическое уравнение имеет вид [11]

$$\lambda = \operatorname{tg} \lambda. \quad (10)$$

Уравнение (10) вначале решим графически [13] и приближенно найдем несколько его наименьших корней, которые затем уточним с помощью метода секущих [13, 14]; полученные таким образом несколько наименьших корней уравнения (10) имеют следующий вид:

$$\lambda_1 \cong 4,493, \quad \lambda_2 \cong 7,725, \quad \lambda_3 \cong 10,904, \quad \lambda_4 \cong 14,066. \quad (11)$$

Корням (11) уравнения (10) соответствуют формы потери устойчивости

$$w_k(\xi) = C_1 \left[ \sin(\lambda_k \xi) - \lambda_k \xi + \lambda_k (1 - \cos(\lambda_k \xi)) \right], \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

3) Для стержня с жестко закрепленными краями характеристическое уравнение принимает вид [11]

$$\sin \left( \frac{\lambda}{2} \right) \left( \sin \left( \frac{\lambda}{2} \right) - \frac{\lambda}{2} \cos \left( \frac{\lambda}{2} \right) \right) = 0. \quad (13)$$

Уравнение (13) вначале решим графически, далее уточним приближенно найденные корни с помощью метода секущих [13, 14] и в результате получим

$$\lambda_1 \cong 6,283, \quad \lambda_2 \cong 8,987, \quad \lambda_3 \cong 12,566, \quad \lambda_4 \cong 15,451. \quad (14)$$

Корням (14) уравнения (13) соответствуют формы потери устойчивости

$$w_k(\xi) = C_4 \left[ 1 - \cos(\lambda_k \xi) + \frac{\cos(\lambda_k) - 1}{\lambda_k - \sin(\lambda_k)} (\lambda_k \xi - \sin(\lambda_k \xi)) \right], \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

Для стержня с кольцевым поперечным сечением момент инерции [15]

$$J = \frac{\pi}{64} (D_a^4 - D^4), \quad (16)$$

где  $D_a$  и  $D$  — наружный и внутренний диаметры.

С учетом очевидных соотношений  $D_a = D_m + (s - c)$  и  $D = D_m - (s - c)$  приведем формулу (16) к виду

$$J = \frac{\pi}{8} D_m (s - c) (D_m^2 + (s - c)^2). \quad (17)$$

С учетом (14) и (3) вторая формула (6) примет следующий вид:

$$\sigma_k = \frac{1}{8} E \frac{(D_m^2 + (s - c)^2)}{L^2} \lambda_k^2, \quad k = 1, 2, \dots \quad (18)$$

В силу приближенного равенства  $\pi^2/8 \cong 1,234$ , введя величину  $\eta = \pi/\lambda_1$  и пренебрегнув величиной  $(s - c)^2$  по сравнению с величиной  $D_m^2$ , приводим формулу (18) к виду (1). При этом в соответствии с наименьшими значениями корней (8), (11) и (14) получаем:  $\eta = 1$  — для шарнирно закрепленного на краях стержня,  $\eta \cong 0,699$  — для жестко закрепленного на одном и шарнирно на другом крае стержня и  $\eta \cong 0,500$  — для стержня с жестко закрепленными краями.

**Анализ критических нагрузок и форм потери устойчивости при сжатии НК с разными закреплениями краев.** Рассматриваем НК ТВС в виде теряющих устойчивость сжатых стержней с двумя шарнирно закрепленными краями; одним шарнирно и другим жестко закрепленными краями; с двумя жестко закрепленными краями, как в нормах расчета на прочность [10]. Критические силы и напряжения рассчитаем с учетом исходных данных при помощи формул (6), в которых учтем значения (8), (11), (14) и выражение (17); формы потери устойчивости определим при помощи выражений (9), (12), (15). Результаты расчетов критических значений сжимающих сил и напряжений (табл. 2) показывают, что ограничения деформации краев приводят к уменьшению разницы между значениями критических сил (и, естественно, напряжений), соответствующих различным формам потери устойчивости. Формы потери устойчивости НК с различными закреплениями краев, соответствующие различным критическим значениям сжимающей силы, представлены на рис. 2.

Сжимающие напряжения от эксплуатационных нагрузок в НК ТВС в процессе эксплуатации в значительной степени определяются их взаимодействием с хвостовиком, головкой и дистанционирующей решеткой, на которое могут влиять многие факторы, в том числе несогласованность деформаций температурного расширения из-за разной жесткости взаимодействующих деталей и характеристик их конструкционных материалов. Определение сжимающих

Таблица 2. Критические значения сжимающей силы и напряжения НК ТВС с различными закреплениями краев

| k | Критические значения $P_k$ , кгс ( $\sigma_k$ , МПа) |  |                                    |
|---|--|--|------------------------------------|
|   | Шарнирное закрепление обоих краев НК                 | Шарнирное закрепление одного и жесткое другого края НК | Жесткое закрепление обоих краев НК |
| 1 | 5,99 (1,87)  | 12,25 (3,83)   | 23,96 (7,49)                       |
| 2 | 23,96 (7,49)   | 36,22 (11,32)  | 49,01 (15,32)                      |
| 3 | 53,91 (16,85)  | 72,16 (22,56)  | 95,84 (29,96)                      |
| 4 | 95,84 (29,96)  | 120,08 (37,54)   | 144,88 (45,30)                     |

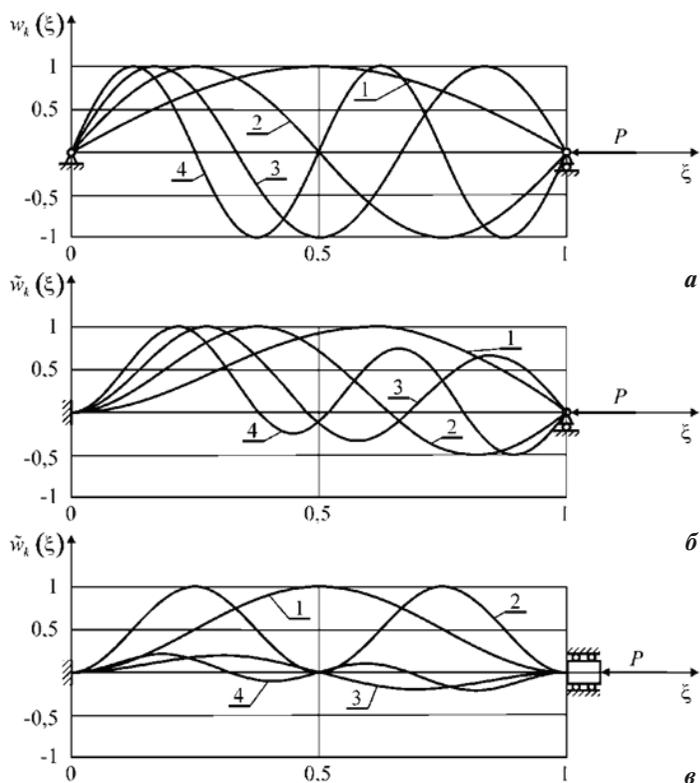


Рис. 2. Формы потери устойчивости (с нормированными значениями прогиба) шарнирно закрепленных на краях (а), жестко закрепленных на одном и шарнирно закрепленных на другом крае (б) и жестко закрепленных на краях (в) НК ТВС ядерного реактора ВВЭР-1000:  
 1 – k = 1; 2 – k = 2; 3 – k = 3; 4 – k = 4

напряжений в НК ТВС с учетом перечисленных факторов представляет достаточно сложную задачу, погрешность решения которой с применением компьютерного моделирования может оказаться сопоставимой с разностью между величинами критических значений сжимающего напряжения (табл. 2). С учетом перечисленных обстоятельств и вероятного характера условий эксплуатации становится возможным, что в процессе эксплуатации сжимающая сила может превысить отвечающие  $k > 1$  критические значения, и форма изогнутого вследствие потери устойчивости направляющего канала может содержать несколько точек перегиба (рис. 2).

В ядерных реакторах ВВЭР-1000 направляющие каналы конструктивно являются несущими элементами, соединяющими головку и хвостовик ТВС и воспринимающими

осевые усилия, деформирование которых ограничено дистанционирующей решеткой [1]. Естественно, что критические нагрузки и напряжения (табл. 2), а также формы потери устойчивости (рис. 2), полученные на основе расчетной схемы НК в виде стержней с различными закреплениями краев, имеют некоторую погрешность. Поэтому значительный интерес представляет определение критических сжимающих сил и форм потери устойчивости НК с учетом взаимодействия с головкой, хвостовиком и дистанционирующей решеткой ТВС, что представляет достаточно сложную задачу. В этой связи актуальна разработка расчетных схем отдельных деталей ТВС для обоснования их ресурса, а также расчетных схем ТВС в целом для исследования процессов в активной зоне реактора.

**Выводы**

Результаты, полученные при исследовании устойчивости деформирования и форм изгиба НК ТВС ядерного реактора ВВЭР-1000, позволили сделать следующие выводы.

1. В процессе эксплуатации ТВС ядерных реакторов ВВЭР-1000 исключается возможность местной потери устойчивости НК, но при этом существует возможность потери устойчивости НК как длинного сжатого стержня. Изгиб НК ТВС из-за потери устойчивости затрудняет движение по нему поглощающих элементов кластеров системы управления и защиты и может привести к нарушению нормальных условий эксплуатации активной зоны реактора.

2. Невысокие критические значения сжимающей силы, соответствующей потере устойчивости НК ТВС как длинного сжатого стержня, существенно ограничивают запас устойчивости деформирования, в результате чего при эксплуатации возможно превышение сжимающей силой критических значений, отвечающих даже формам потери устойчивости с числом перегибов  $k > 1$ . Таким образом, форма изогнутого при эксплуатации вследствие потери устойчивости НК ТВС может содержать несколько точек перегиба.

3. Полученные расчетные данные имеют некоторую погрешность, поскольку при определении критического значения сжимающей силы не учитывалось контактное взаимодействие НК с головкой, хвостовиком и дистанционирующей решеткой ТВС. Точный учет влияния перечисленных факторов на значения критических нагрузок, соответствующих потере устойчивости направляющего канала, представляет собой сложную задачу даже при условии применения компьютерного моделирования.

4. Актуальна разработка расчетных схем отдельных деталей и узлов ТВС, а также самих ТВС как единого целого, позволяющих исследовать процессы деформирования

эксплуатационными нагрузками для решения проблем, связанных с работоспособностью оборудования, что рекомендуется рассмотреть в последующих исследованиях.

### Список использованной литературы

1. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / В. Д. Шмелев, Ю. Г. Драгунов, В. П. Денисов, И. Н. Васильченко. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. — 220 с.

2. Ефимов О. В. Конструкції, матеріали, процеси і розрахунки реакторів і парогенераторів АЕС: Навч. посібник / О. В. Ефимов, М. М. Пилипенко. — Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2010. — 268 с.

3. Колтаков В. И. Эволюция проектов реакторных установок ВВЭР-1000 / В. И. Колтаков, Н. А. Стефанишин, С. А. Остапчук // Ядерная та радіаційна безпека. — К., 2011. — Вып. 4(52). — С. 32–39.

4. Dragunov Yu. V. Prospects of development of WWER-type pressurized light-water reactor installations / Yu. G. Dragunov, S. B. Ryzhov, V. A. Mokhov // Thermal Engineering. — 2007. — Vol. 54, Issue 5. — P. 343–347.

5. VVER-1000 TVSA fuel assembly: Direction of development and operating results / V. B. Kaidanov, D. G. Preobrazhenskii, A. I. Romanov, O. B. Samoilov, A. A. Fal'kov, A. A. Shishkin // Atomic Energy. — 2007. — Vol. 102, Issue 1. — P. 48–53.

6. Bolshakov V. V. Increasing critical heat flows in VVER-1000 model fuel assemblies by inserting additional spacing lattices / V. V. Bolshakov, L. L. Kobzar, Yu. M. Semchenkov // Atomic Energy. — 2011. — Vol. 109, Issue 6. — P. 380–384.

7. Еременко М. Л. Экспертиза материалов обоснования новых типов ядерного топлива на украинских АЭС. Итоги выполнения независимых проверочных расчетов / М. Л. Еременко, В. А. Халимончук // Ядерная та радіаційна безпека. — 2011. — Вып. 1(49). — С. 9–14.

8. Maksimov M. V. Principles of controlling fuel-element cladding lifetime in variable loading regimes / M. V. Maksimov, S. N. Pelykh, R. L. Gontar // Atomic Energy. — 2012. — Vol. 112, Issue 4. — P. 241–249.

9. Modelling temperature nonuniformities in a fuel-element bundle of VVER-1000 fuel-assembly / S. I. Getya, V. G. Krapivtsev, P. V. Markov, V. I. Solonin, S. I. Tsirin // Atomic Energy. — 2014. — Vol. 112, Issue 1. — P. 69–72.

10. Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.

11. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1967. — 984 с.

12. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-х т. / Под ред. И. А. Биргер, Я. Г. Пановко. — Т. 3 / В. В. Болотин [и др.]. — М.: Машиностроение, 1968. — 567 с.

13. Загускин В. Л. Справочник по численным методам решения алгебраических и трансцендентных уравнений: Справ. издание / В. Л. Загускин; ред. А. М. Лопшиц. — М.: Физматгиз, 1960. — 216 с.

14. Калиткин Н. Н. Численные методы: Уч. пособие / Н. Н. Калиткин; ред. А. А. Самарский. — М.: Наука, 1978. — 512 с.

15. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник в 3-х т. / Под ред. И. А. Биргер, Я. Г. Пановко. — Т. 1 / Б. Л. Абрамян [и др.]. — М.: Машиностроение, 1968. — 831 с.

### References

1. Shmelev, V. D., Dragunov, Yu. G., Denisov, V. P., Vasilchenko, I. N. (2004), “WWER Cores for Nuclear Power Plants” [Aktivnye zony VVER dlia atomnykh elektrostantsii], IKTs “Akademkniga”, Moscow, 220 p. (Rus)

2. Yefimov, O. V., Pylypenko, M. M. (2010), “Designs, Materials, Processes and Calculations of Nuclear Reactors and Steam Generators for Nuclear Power Plants [Konstruktsii, materialy, protsesy i rozrakhunky reaktoriv i paroheneratoriv AES], Educational Book, Pidruchnyk NTU “KhPI”, Kharkiv, 268 p. (Ukr)

3. Koltakov, V. I., Stefanishin, N. A., Ostapchuk, S. A. (2011), “Evolution of WWER-1000 Designs” [Evolutsiia proektov reaktornykh ustanovok VVER-1000], Nuclear and Radiation Safety, No. 4(52), pp. 32–39. (Rus)

4. Dragunov, Yu. G., Ryzhov, S. B., Mokhov, V. A. (2007), “Prospects of Development of WWER-Type Pressurized Light-Water Reactor Installations”, Thermal Engineering, Vol. 54, Issue 5, pp. 343–347.

5. Kaidanov, V. B., Preobrazhenskii, D. G., Romanov, A. I., Samoilov, O. B., Falkov, A. A., Shishkin, A. A. (2007), “WWER-1000 TVSA Fuel Assembly: Direction of Development and Operating Results”, Atomic Energy, Vol. 102, Issue 1, pp. 48–53.

6. Bolshakov, V. V., Kobzar, L. L., Semchenkov, Yu. M. (2011), “Increasing Critical Heat Flows in WWER-1000 Model Fuel Assemblies by Inserting Additional Spacing Lattices”, Atomic Energy, Vol. 109, Issue 6, pp. 380–384.

7. Yeremenko, M. L., Khalimonchuk, V. A. (2011), “Technical Review of Safety Analysis Reports under New WWER Fuel Implementation on Ukrainian NPPs. Experience of Carrying Out Independent Verifying Calculations” [Ekspertiza materialov obosnovaniia novykh tipov yadernogo topliva na ukrainskikh AES. Itogi vypolneniia nezavisimykh proverochnykh raschetov], Nuclear and Radiation Safety, No. 1(49), pp. 9–14. (Rus)

8. Maksimov, M. V., Pelykh, S. N., Gontar, R. L. (2012), “Principles of Controlling Fuel-Element Cladding Lifetime in Variable Loading Regimes”, Atomic Energy, Vol. 112, Issue 4, pp. 241–249.

9. Getya, S. I., Krapivtsev, V. G., Markov, P. V., Solonin, V. I., Tsirin, S. I. (2014), “Modelling Temperature Nonuniformities in a Fuel-Element Bundle of WWER-1000 Fuel Assembly”, Atomic Energy, Vol. 112, Issue 1, pp. 69–72.

10. Strength Calculation Rules for NPP Equipment and Piping Elements (PNAE G-7-002-86) [Normy rascheta na prochnost' elementov oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok (PNAE G-7-002-86)], the USSR State Committee for Supervision of Safety in Nuclear Energy, Energoatomizdat, Moscow, 525 p. (Rus)

11. Volmir, A. S. (1967), “Stability of Deformable Systems” [Ustoichivost' deformiruemykh sistem], 2-nd Ed., Nauka, Moscow, 984 p. (Rus)

12. Bolotin, V. V., Birger, I. A., Panovko, Ya. G. (1968), “Strength, Stability, Vibrations” [Prochnost, ustoichivost, kolebaniia] Reference Book in Three Volumes, Mashinostroenie, Moscow, 567 p. (Rus)

13. Zaguskin, V. L., Lopshits, A. M. (1960), “Handbook of Numerical Methods for Solving Algebraic and Transcendental Equations” [Spravochnik po chislennym metodam resheniia algebraicheskikh i transtsendentnykh uravnenii], Fizmatgiz, Moscow, 216 p. (Rus)

14. Kalitkin, N. N., Samarskii, A. A. (1978), “Numerical Methods” [Chislennye metody]. Nauka, Moscow, 512 p. (Rus)

15. Abramian, B. L., Birger, I. A., Panovko, Ya. G. (1968), “Strength, Stability, Vibrations” [Prochnost, ustoichivost, kolebaniia], Reference Book in Three Volumes, Mashinostroenie, Moscow, 831 p.

Получено 09.06.2015.